

宇宙背景ニュートリノ崩壊探索実験 COBANDに向けたSOI-STJ開発

2016年10月26-27日

超伝導エレクトロニクス研究会

@東北大学電気通信研究所

武内勇司 (筑波大)

on behalf of COBAND collaboration

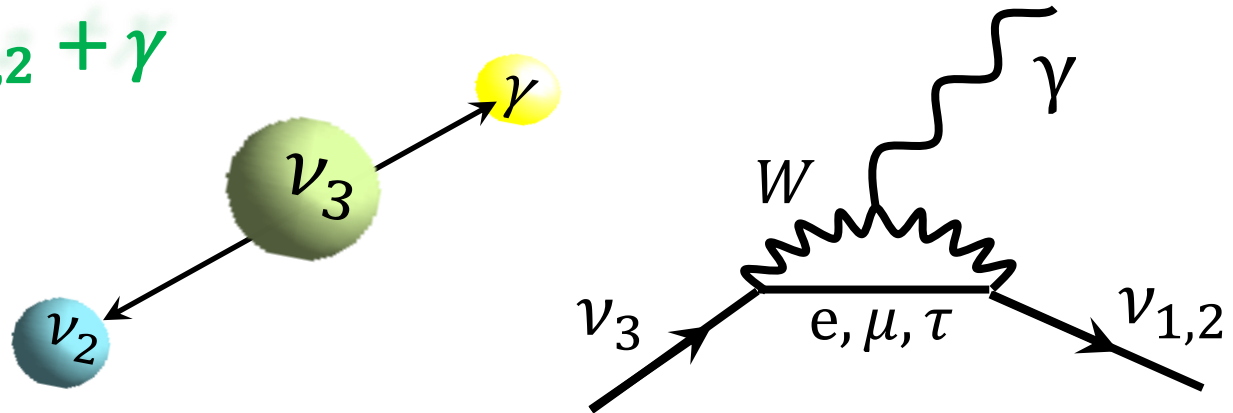


COBAND (COsmic BAckground Neutrino Decay)



- ニュートリノ：3世代の質量固有状態 (ν_1, ν_2, ν_3)
- 重たいニュートリノ (ν_2, ν_3) は安定ではない(崩壊する)

$$- \nu_3 \rightarrow \nu_{1,2} + \gamma$$



- ✓ しかし，その寿命は宇宙年齢よりもずっと長い
- ➔ 宇宙全体に存在すると予言されている「宇宙背景ニュートリノ (CνB)」をニュートリノ源としてニュートリノ崩壊を探索

$$\rho(\nu_3 + \bar{\nu}_3) \sim 110/\text{cm}^3$$

COBAND Collaboration Members (2016年10月現在)

Shin-Hong Kim, Yuji Takeuchi, Kenichi Takemasa, Kazuki Nagata, Kota Kasahara, Shunsuke Yagi, Rena Wakasa, Yoichi Otsuka (筑波大), Hirokazu Ikeda, Takehiko Wada, Koichi Nagase (JAXA/ISAS), Shuji Matsuura (関西学院大), Yasuo Arai, Ikuo Kurachi, Masashi Hazumi (高エネルギー加速器研究機構), Takuo Yoshida, Chisa Asano, Takahiro Nakamura (福井大), Satoshi Mima, Kenji Kiuchi (理研), Hirokazu Ishino, Atsuko Kibayashi (岡山大), Yukihiro Kato (近畿大), Go Fujii, Shigetomo Shiki, Masahiro Ukibe, Masataka Ohkubo (産総研), Shoji Kawahito (静岡大), Erik Ramberg, Paul Rubinov, Dmitri Sergatskov (Fermilab), Soo-Bong Kim (Seoul National University)

Motivation of ν -decay search in $C\nu B$

ν_3 Lifetime

- 素粒子標準模型予言値: $\tau = O(10^{43}) \text{ yrs}$
- 寿命測定下限値: $\tau > O(10^{12}) \text{ yrs}$
- 標準模型を超える理論(左右対称模型)予言値: $\tau = O(10^{17}) \text{ yrs}$

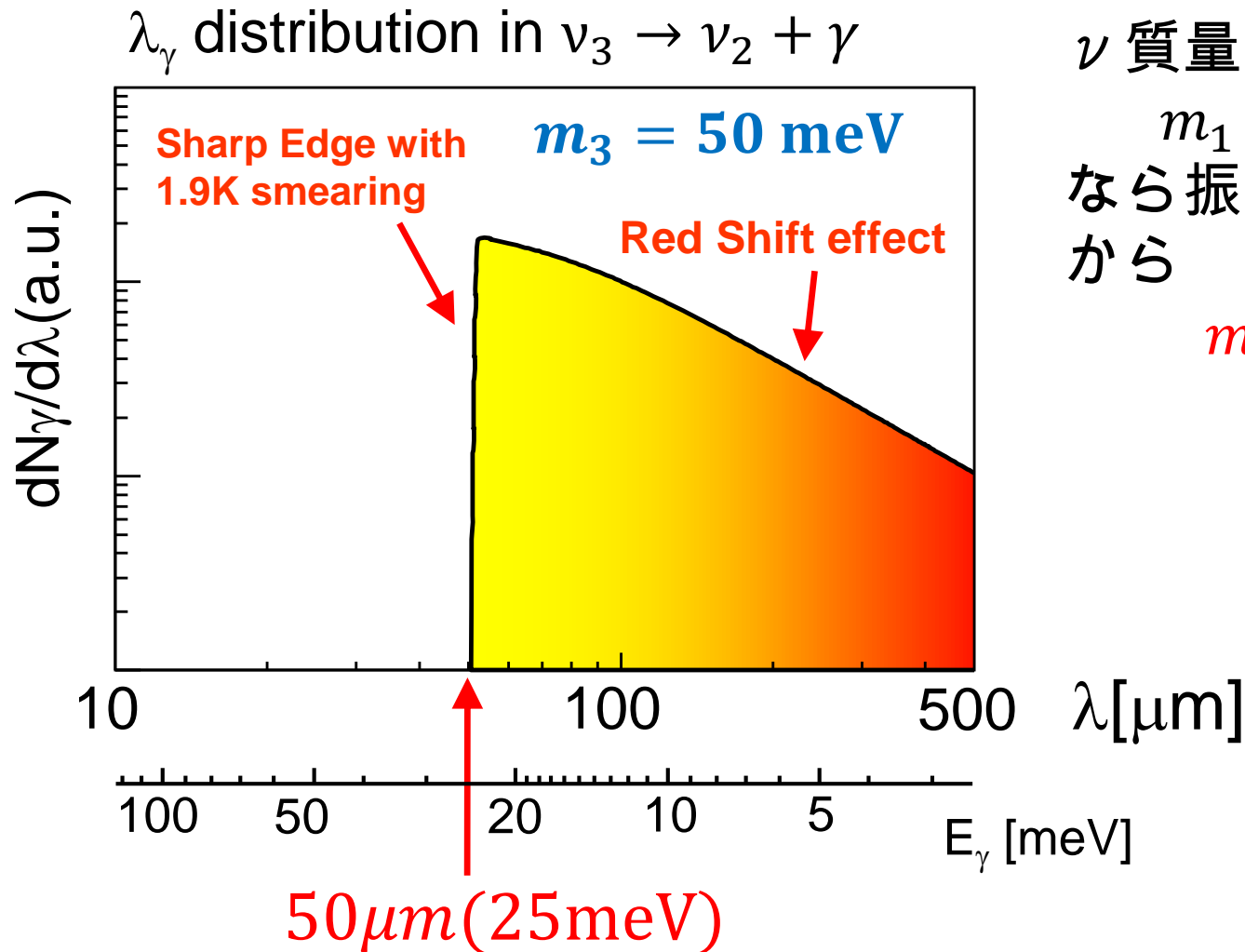
W_L - W_R mixing angle $|\zeta| \sim 0.02$ の場合

もし $C\nu B$ からのニュートリノ崩壊光が標準模型の予想よりずっと短く観測されてしまったら

- 標準模型を超える物理の発見
- 宇宙背景ニュートリノ($C\nu B$)の実験的観測
- ニュートリノ質量の決定
 - $m_3 = (m_3^2 - m_{1,2}^2)/(2E_\nu)$

→ Aiming at a sensitivity to ν_3 lifetime in $O(10^{13} - 10^{17}) \text{ yrs}$

Expected photon wavelength spectrum from CνB decays



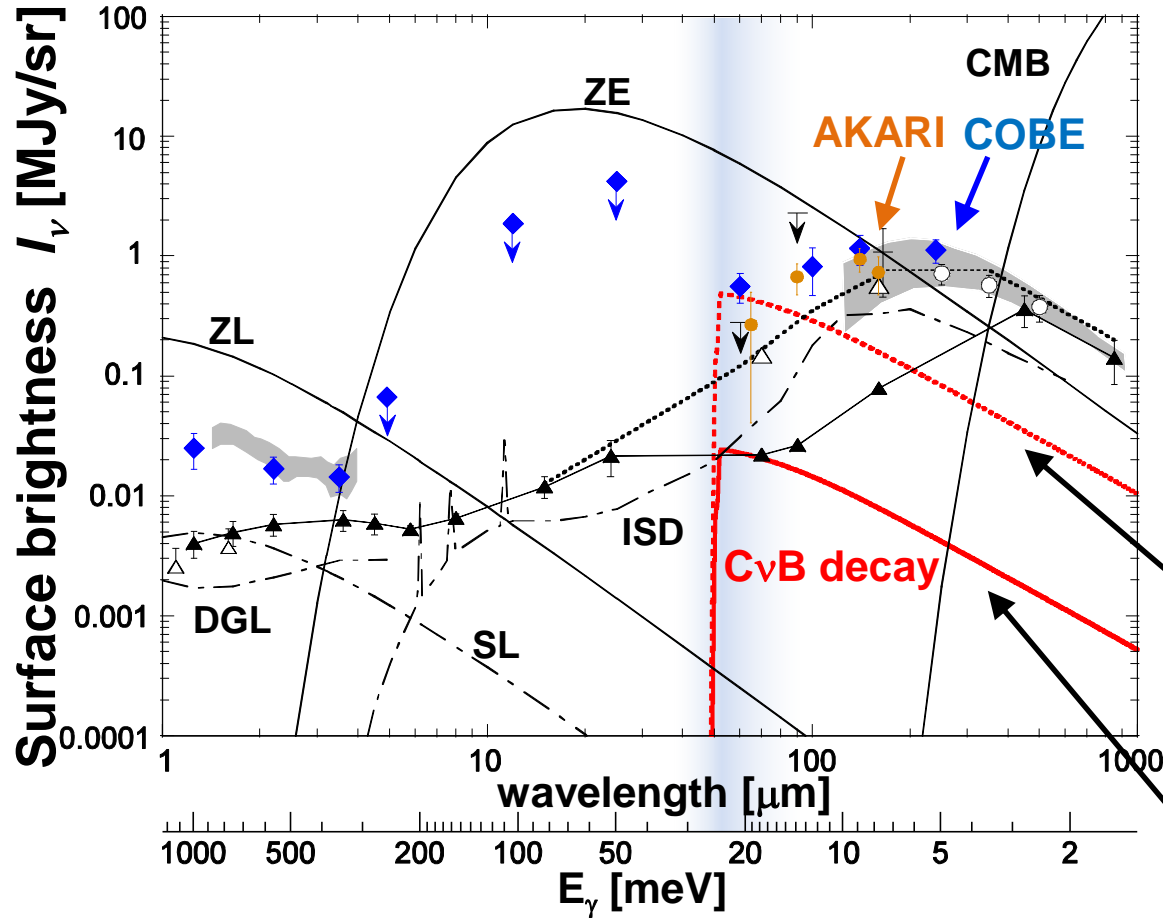
ν 質量階層

$m_1 \ll m_2 < m_3$
なら振動実験の結果
から

$m_3 \sim 50 \text{ meV}$

このような鋭いエネルギー端を持つ光源は他に存在しない!!

CνB 崩壊と背景事象



Expected E_γ spectrum
for $m_3 = 50\text{meV}$

黄道光(ZE)

$I_\nu \sim 8\text{MJy/sr}$

宇宙赤外線背景放射
(CIB)

$I_\nu \sim 0.1 \sim 0.5\text{MJy/sr}$

CνB decay

$\tau = 5 \times 10^{12}\text{yrs}$

$I_\nu \sim 0.5\text{MJy/sr}$

excluded

$\tau = 1 \times 10^{14}\text{yrs}$

$I_\nu \sim 25\text{kJy/sr}$

at $\lambda = 50\mu\text{m}$

$$1\text{Jy} = 10^{-26}\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz}$$

Proposal for COBAND Rocket Experiment

Aiming at a sensitivity to ν lifetime for
 $\tau(\nu_3) = O(10^{14})$ yrs

■ JAXA sounding rocket S-520

- <http://www.isas.jaxa.jp/e/enterp/rockets/sounding/s520.shtml>
- Diameter: 520mm
- Payload: 100kg
- Altitude: 300km

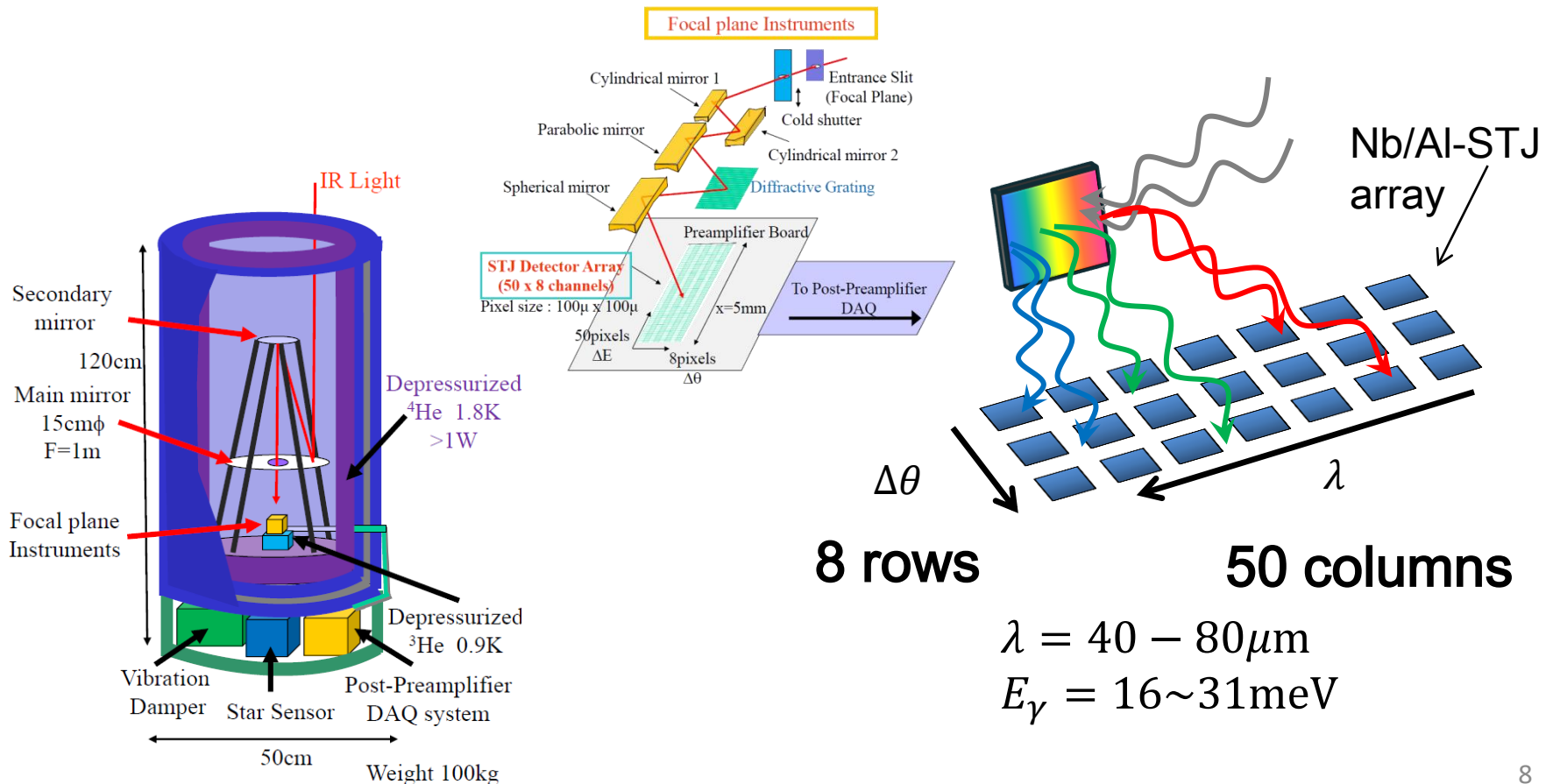


- 弾道飛行中に高度200~300kmで約200秒の観測
 - 直径15cm 焦点距離1mの望遠鏡
 - 光学系(mirrors, filters, shutters and grating) は全て~1.8K以下に冷却

COBAND ロケット実験計画

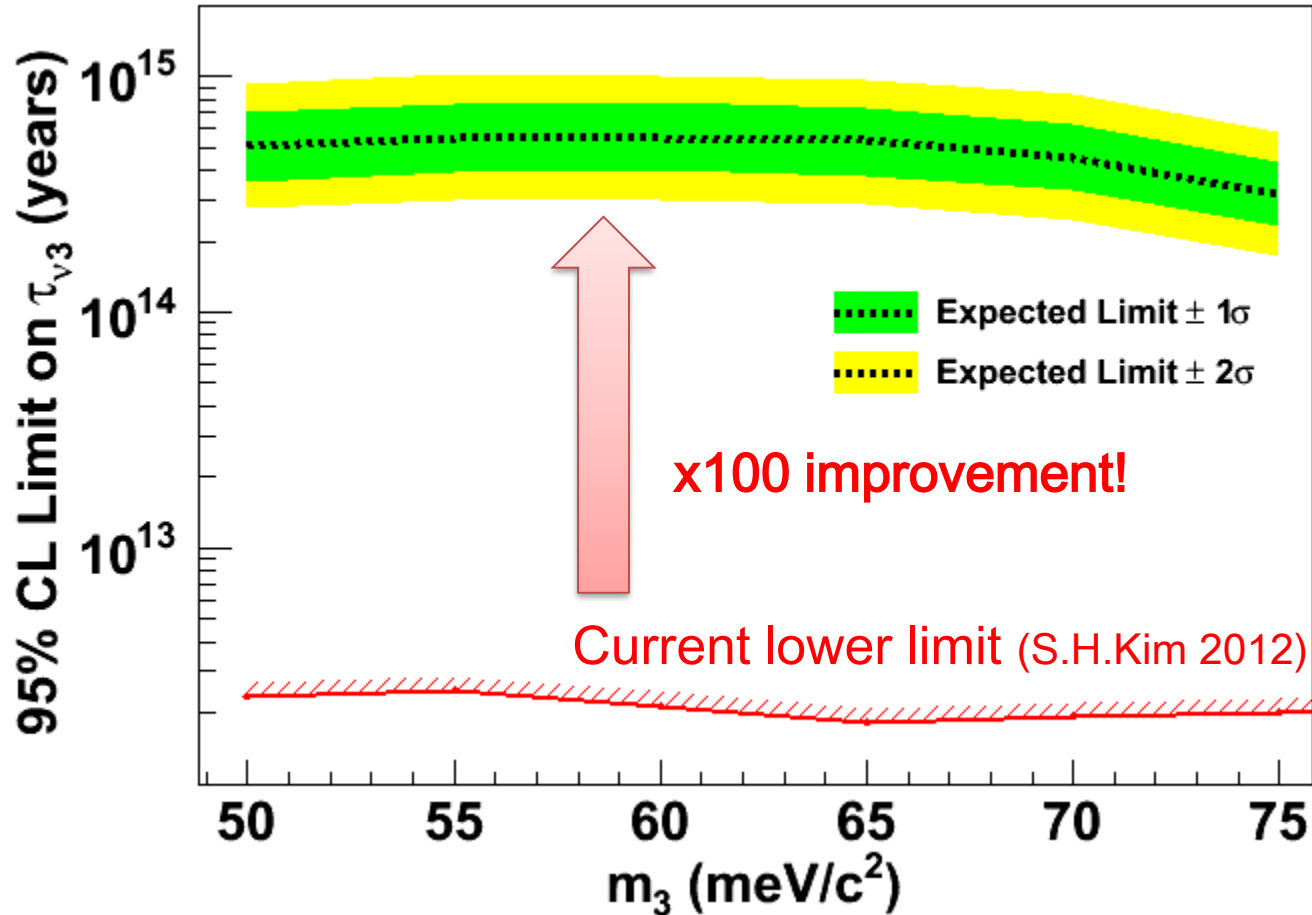
焦点位置に $\lambda=40\text{-}80\mu\text{m}$ ($16\text{-}31\text{meV}$) をカバーする回折格子と 光検出素子の $50(\text{波長方向}) \times 8(\text{空間方向})$ 配列

- 各素子は, 遠赤外光($\lambda=40\text{-}80\mu\text{m}$) の各波長の光子をカウント
- 素子当たり $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 有感領域(視野角 $100\mu\text{rad} \times 100\mu\text{rad}$)



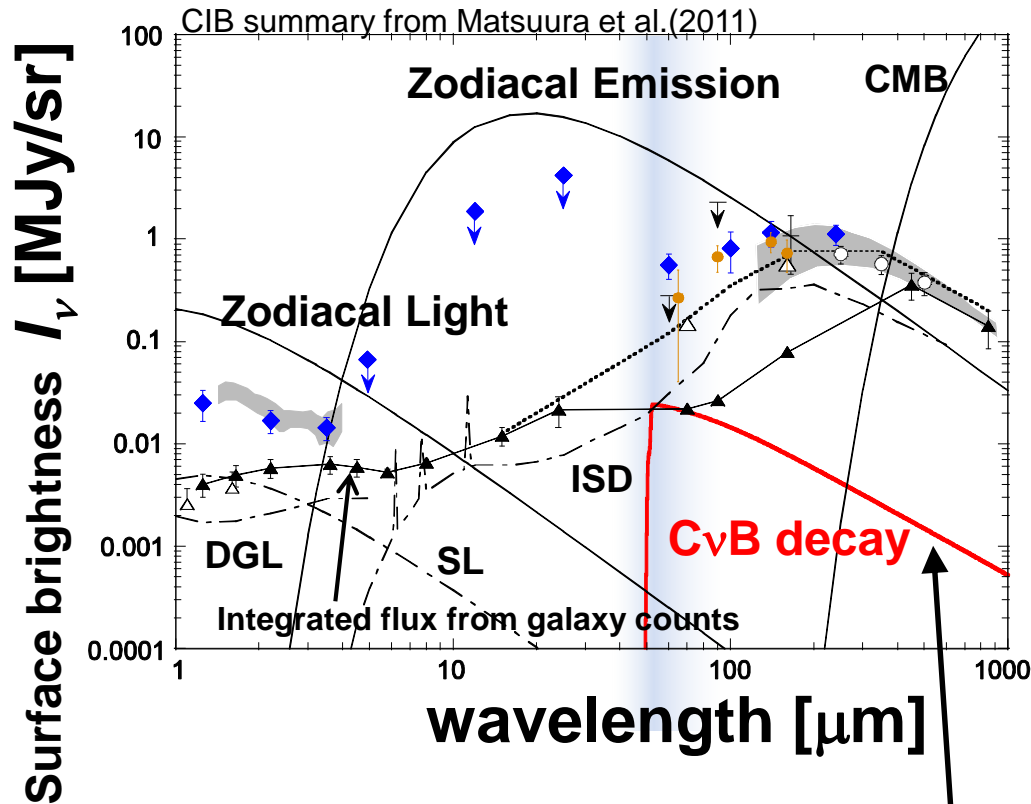
Sensitivity to neutrino decay

Parameters in the rocket experiment simulation are assumed.



- Can set lower limit on ν_3 lifetime at $4-6 \times 10^{14}$ yrs if no neutrino decay
- If ν_3 lifetime were 2×10^{14} yrs, the signal significance would be at 5σ level

Requirements for the photo-detector in the rocket experiment



$$\tau = 1 \times 10^{14} \text{ yrs}$$
$$m_3 = 50 \text{ meV}$$

Zodiacal Emission

- $I_{ZE} = 8 \text{ MJy/sr}$
 $\rightarrow 1.1 \times 10^{-17} \text{ W / 8pix}$
@ $\lambda = 50 \mu\text{m}$

Neutrino Decay

- $I_\nu = 25 \text{ kJy/sr}$
 $\rightarrow 3.3 \times 10^{-20} \text{ W / 8pix}$
@ $\lambda = 50 \mu\text{m}$

光検出素子に対する雑音等価電力(NEP)要求

- Neutrino decay ($m_3 = 50 \text{ meV}$, $\tau_\nu = 10^{14} \text{ yrs}$): $I_\nu = 25 \text{ kJy/sr}$ @ $\lambda = 50 \mu\text{m}$

$$P_{ND} = 25 \text{ kJy/sr} \times 8 \times 10^{-8} \text{ sr} \times \pi (15 \text{ cm}/2)^2 \times \Delta\nu \\ = 3.3 \times 10^{-20} \text{ W/8pix}$$

- Zodiacal emission: $I_\nu = 8 \text{ MJy/sr}$ @ $\lambda = 50 \mu\text{m}$

$$P_{ZE} = 1.1 \times 10^{-17} \text{ W/8pix}$$

- ◆ Shot noise in P_{ZE} integrated over an interval Δt

– Fluctuation in number of photons with energy ϵ_γ : $\sqrt{\epsilon_\gamma P_{ZE} \Delta t}$

$$\frac{NEP}{\sqrt{2\Delta t}} \times \Delta t \ll \sqrt{\epsilon_\gamma P_{ZE} \Delta t} \ll P_{ND} \Delta t$$

→ $\Delta t > 200 \text{ sec}$

→ 一素子あたり $NEP \sim 0(10^{-20}) \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$

実用化されている遠赤外光検出器

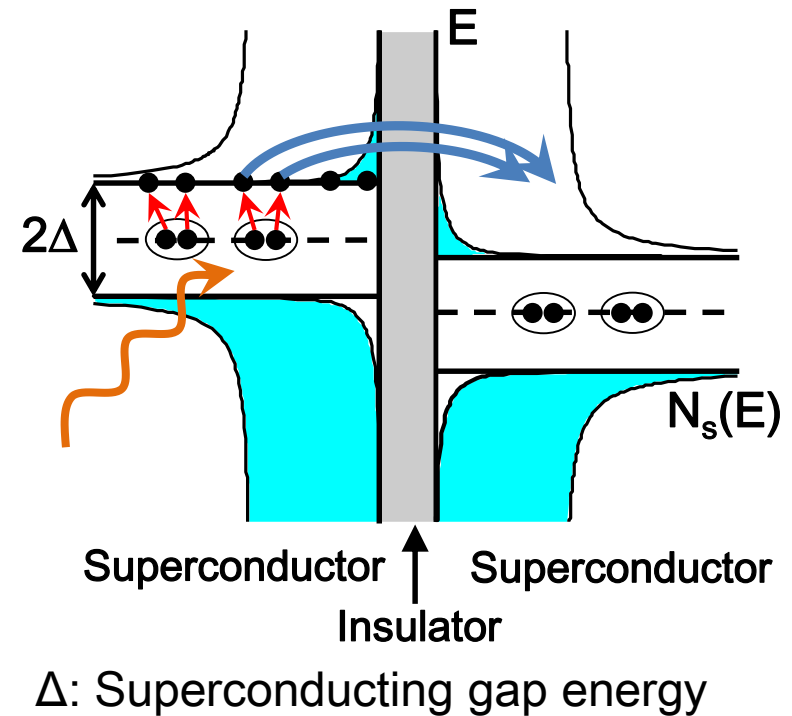
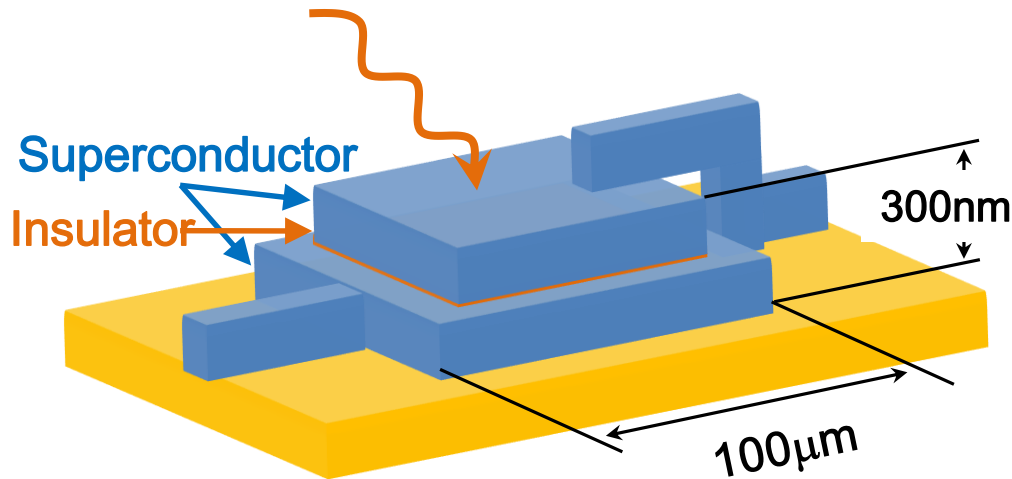
Detectors	$\lambda(\mu\text{m})$	Operation Temp.	NEP ($\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$)	
Monolithic Ge:Ga	50-110	2.2K	$\sim 10^{-17}$	Akari-FIS
Stressed Ge:Ga	60-210	0.3K	$\sim 0.9 \times 10^{-17}$	Herschel-PACS

2桁以上の改善が必要

- 光導電素子→超伝導体トンネル接合素子
 - 遠赤外光の一光子検出(フォトンカウンティング)
- によってNEP $\sim 0(10^{-20}) \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す.

Superconducting Tunnel Junction (STJ) Detector

- Superconductor / **Insulator** / Superconductor
Josephson junction device



- 遠赤外光(25meV)よりも小さな超伝導ギャップエネルギー (Δ)
➔ 遠赤外光の一光子検出が可能
- 比較的高速な応答($\sim \mu\text{s}$) ➔ 光子計数に有利

STJ energy resolution

信号の大きさ ~ 準粒子の数 : $N_{\text{q.p.}} = G \frac{E_\gamma}{1.7\Delta}$

エネルギー分解能 ~ 準粒子数の統計的揺らぎ $\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)FE}$

Δ : Superconducting gap energy

F: Fano factor

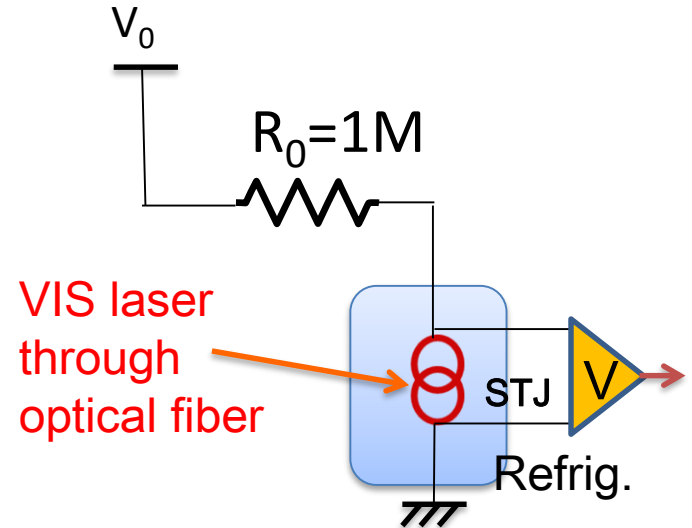
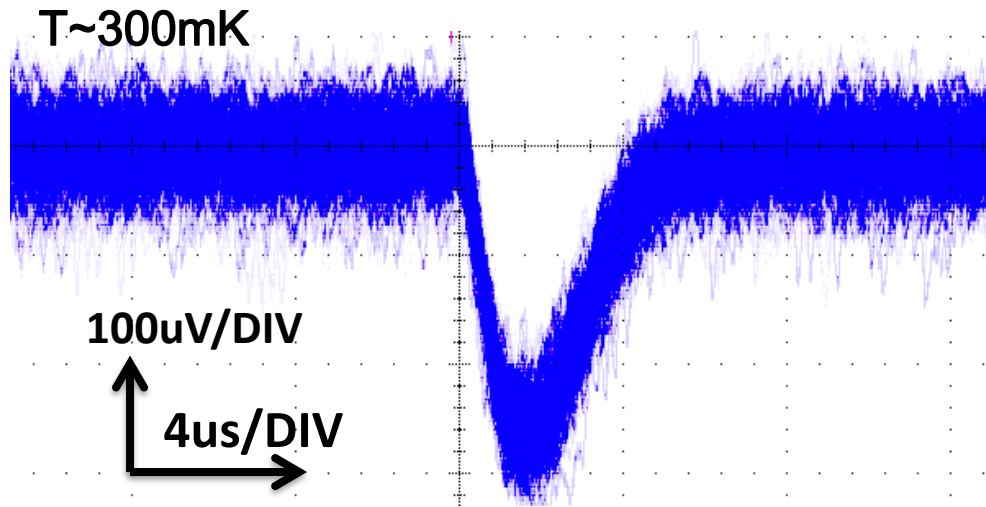
E: Photon energy

G: Back-tunneling gain

Nb/Al-STJ

- よく確立した素子
 - Alの近接効果ありで $\Delta \sim 0.6\text{meV}$
 - Operation temperature $< 400\text{mK}$
 - Back-tunnelling gain $G \sim 10$
 - $N_{\text{q.p.}} = 25\text{meV}/1.7\Delta \times 10 \sim 250$ $\sigma_E/E \sim 0.1$ for $E = 25\text{meV}$
- 25meV 光子の一光子検出は可能

STJ response to pulsed laser

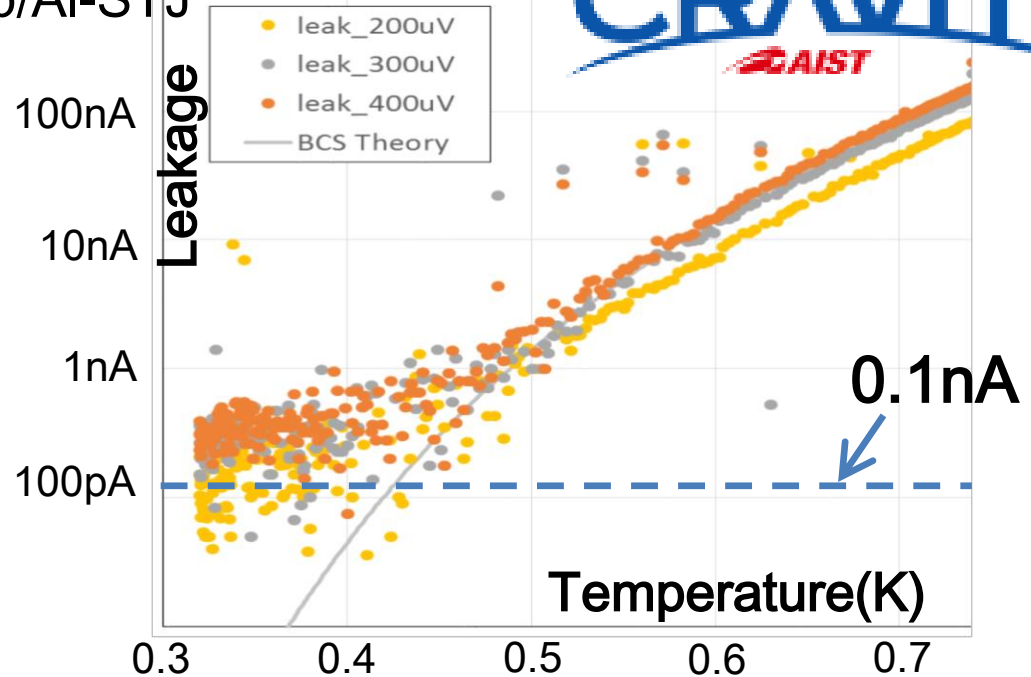
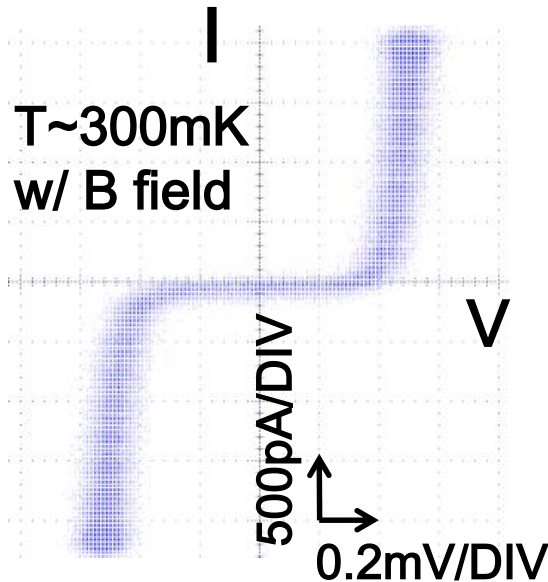


Nb/Al-STJ response to pulsed laser (465nm)
CRAVITY Nb/Al-STJ $100\mu\text{m}$ sq.

- Nb/Al-STJ has $\sim 1\mu\text{s}$ response time.
- ➔ $1\mu\text{s}$ のゲートで信号を積分すればS/Nの向上(NEP の改善)が可能
 - 但し読み出し系に1MHz 以上の帯域が必要

Nb/Al-STJ development at CRAVITY

産総研CRAVITY製50 μ m 角 Nb/Al-STJ

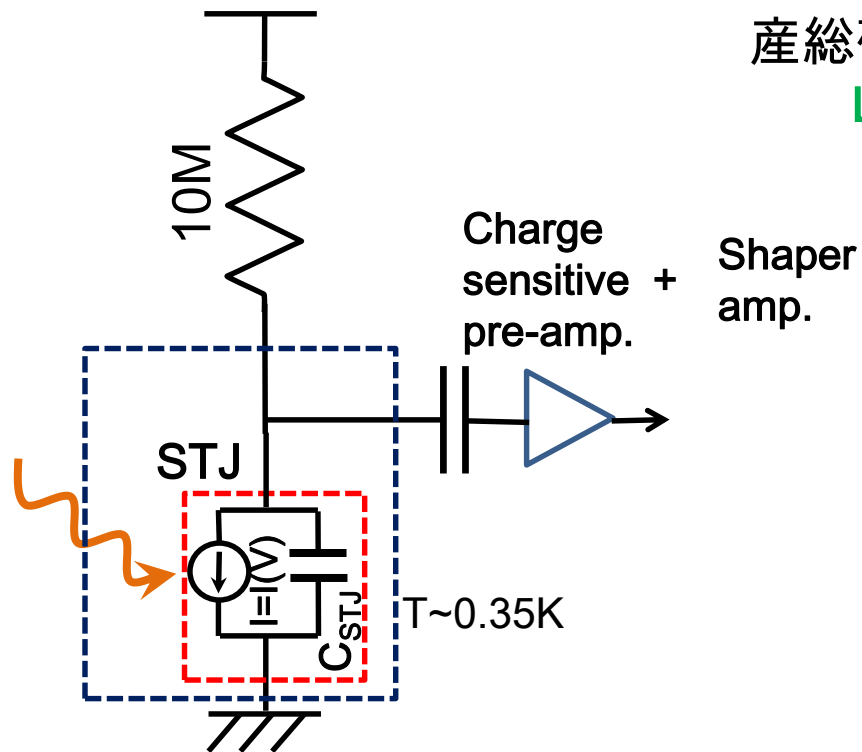


- 50 μ m角でリーク電流 $I_{leak} \sim 200\text{pA}$, 20 μ m角で50pAを達成
- リーク電流のショットノイズ起因のNEPは($i_{leak}=50\text{pA}$, $\Delta=0.6\text{meV}$, $G=10$ の場合)

$$\text{NEP} = \frac{1.7\Delta}{G} \sqrt{\frac{2i_L}{e}} \sim 4 \times 10^{-19} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}} \quad (\text{光子計数を行わない場合})$$

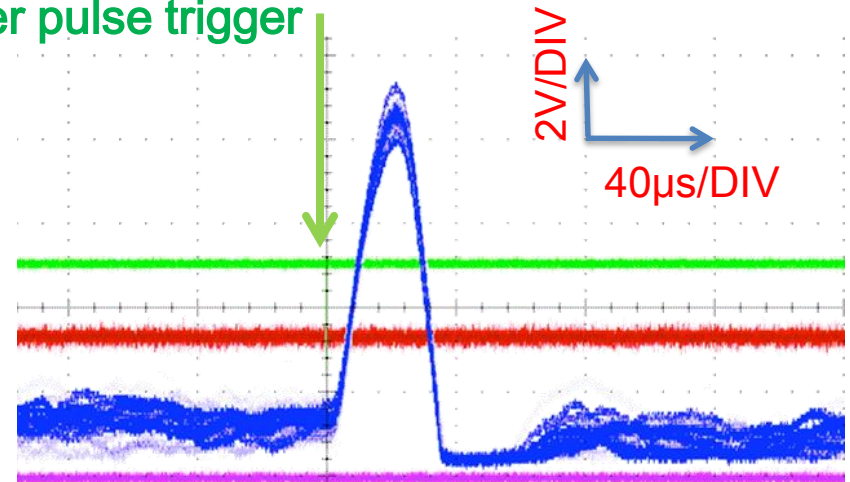
- 光子計数を行うことによって,もう一桁の改善を期待

室温設置の電荷積分アンプ読出しによる 可視光レーザーパルス(465nm)に対するNb/Al-STJ 応答



産総研CRAVITY製 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ Nb/Al-STJ

Laser pulse trigger



STJで10光子程度の検出に対応する応答

Nb/Al-STJ の低入カインピーダンス電荷積分アンプ読出

- 室温に置かれた電荷積分型のアンプでの読出: ノイズ大
- 一光子検出には, 読み出し系のS/N改善が必須

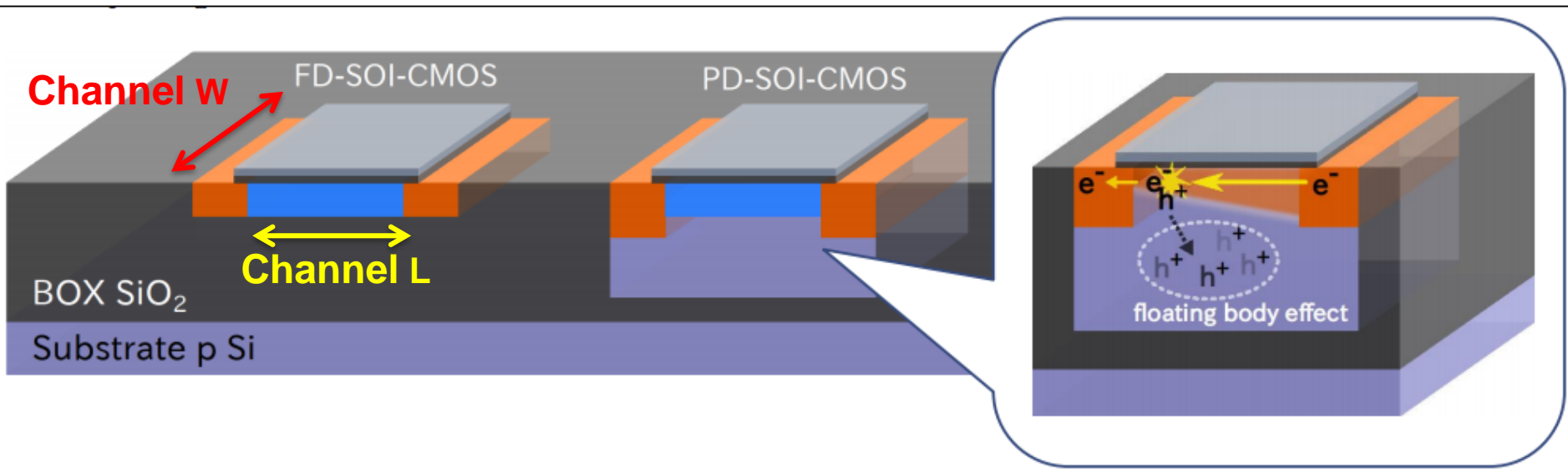
→STJの直近に置ける極低温電荷積分型アンプの開発

FD-SOI-MOSFET at Cryogenic temperature

FD-SOI : **F**ully **D**epleted – **S**ilicon **O**n **I**nsulator

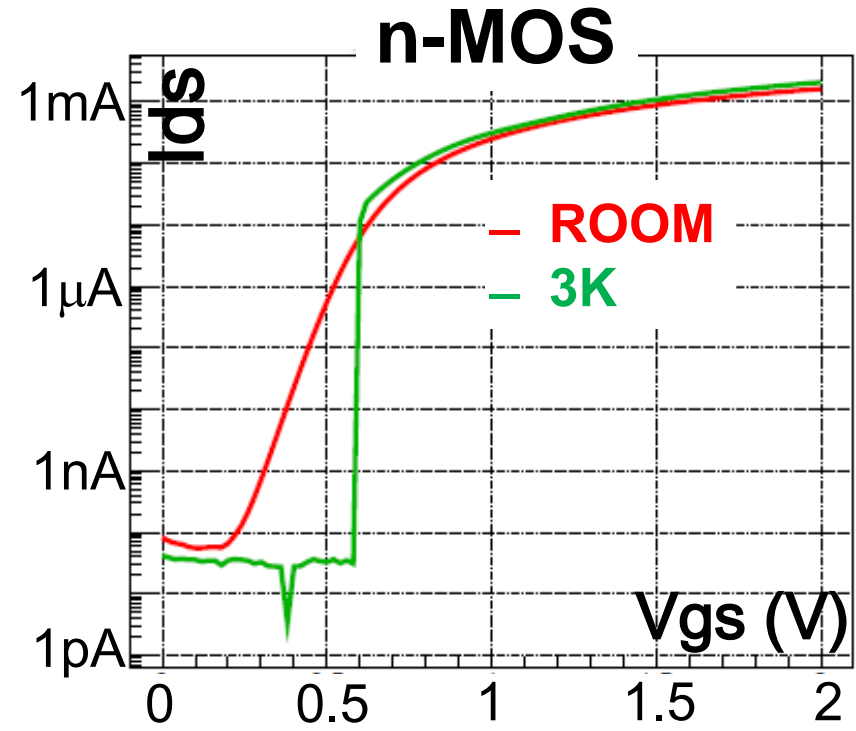
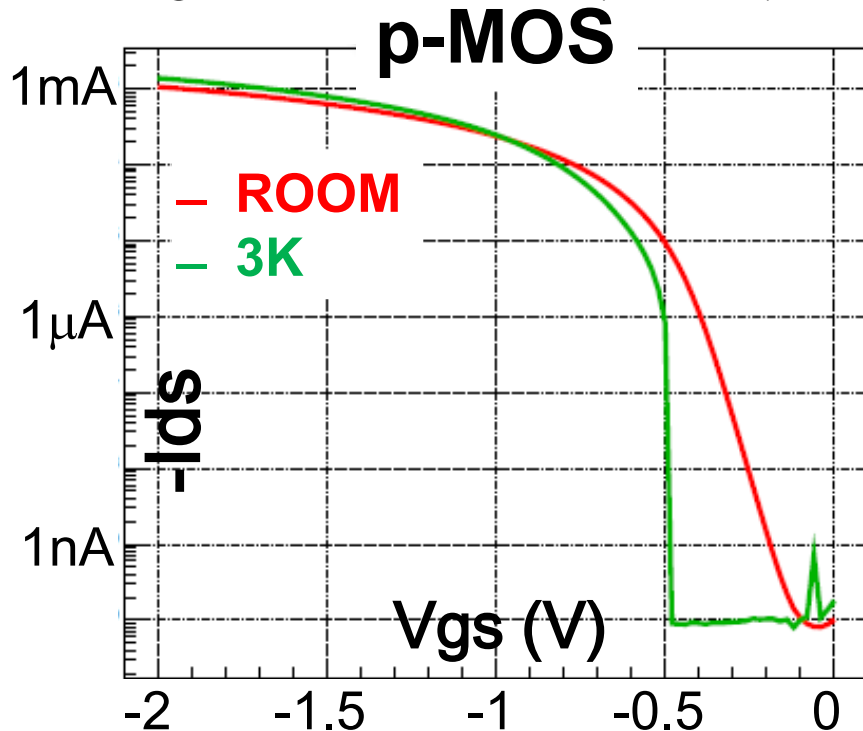
- ✓ Very thin channel layer in MOSFET
 - ◆ No floating body effect caused by charge accumulation in the body
- ✓ FD-SOI-MOSFET is reported to work at 4K

JAXA/ISIS **AIPC 1185,286-289(2009)**
J Low Temp Phys 167, 602 (2012)



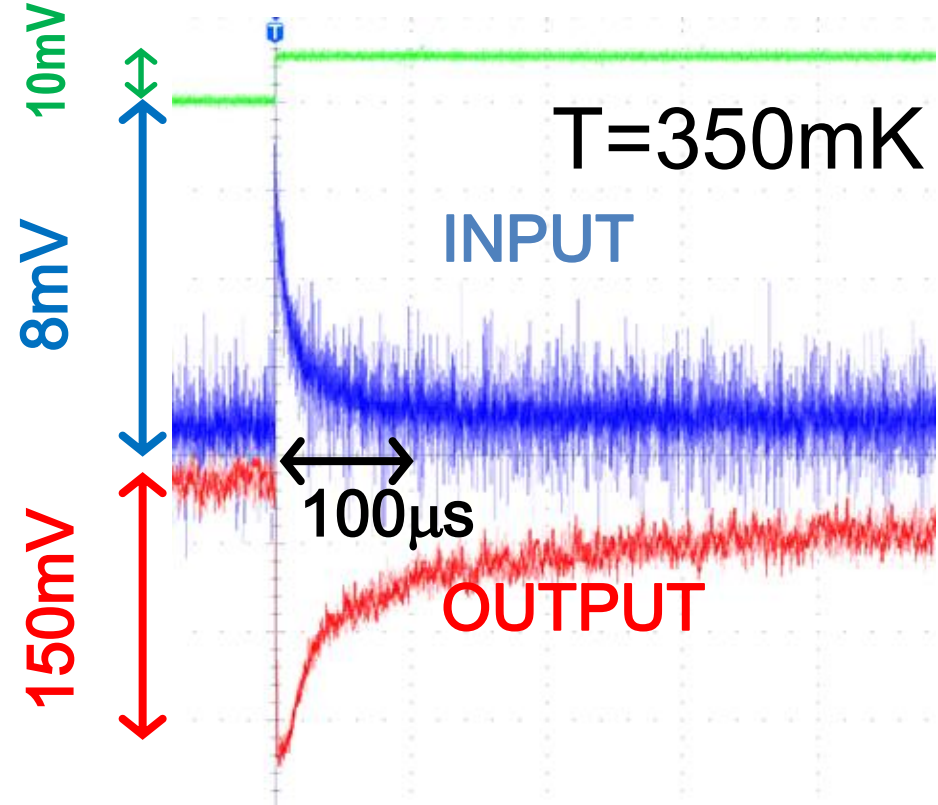
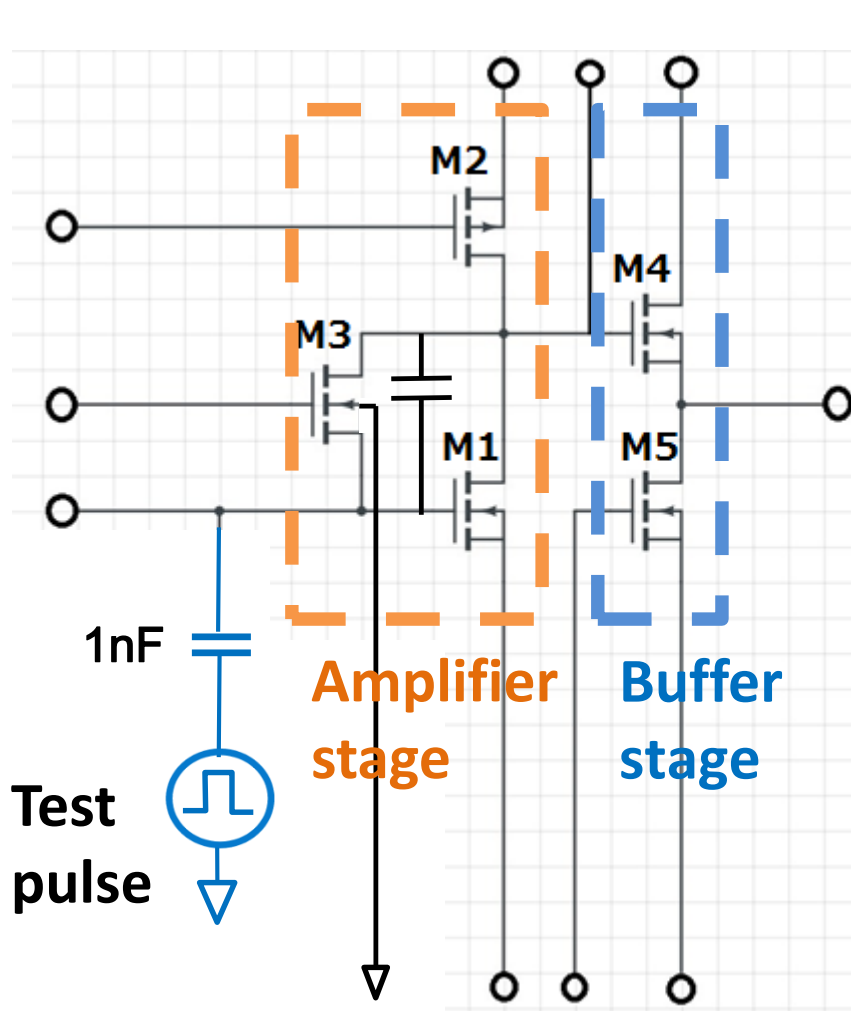
FD-SOI MOSFET I_d - V_g curve

- Id- V_g curve of $W/L=10\mu\text{m}/0.4\mu\text{m}$ at $|V_{ds}|=1.8\text{V}$



- Both p-MOS and n-MOS show excellent performance at 3K (We confirmed they function down to 300mK).
- Threshold shifts, sub-threshold current suppression and increase of the carrier mobility at low temperature.

SOI prototype amplifier

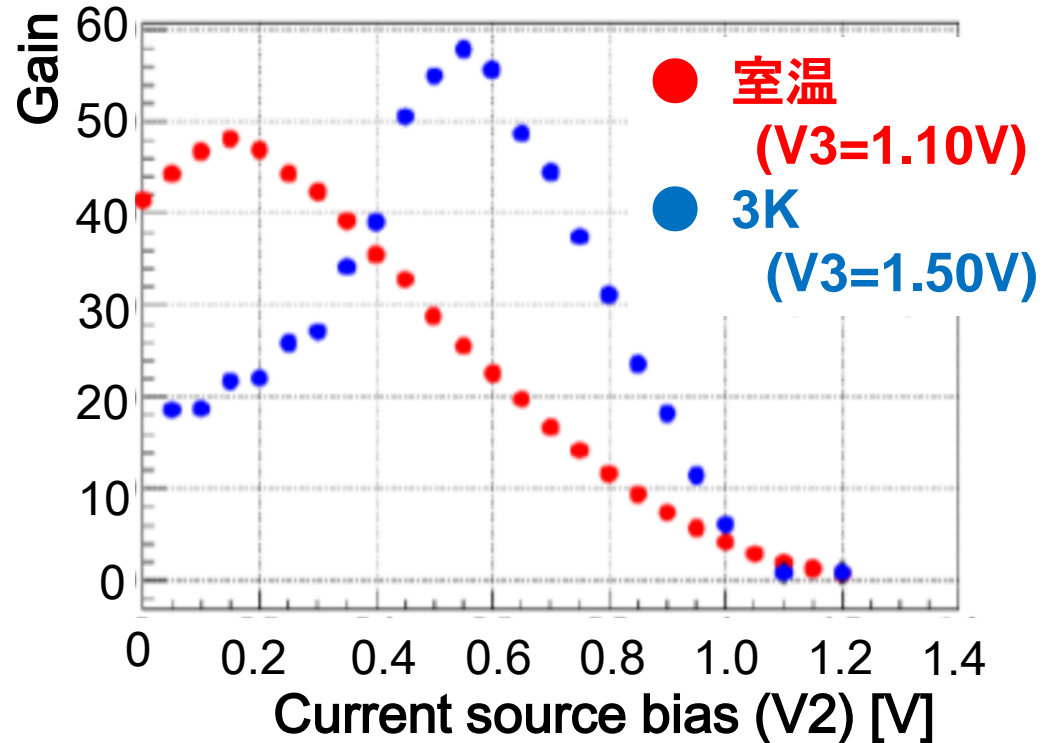
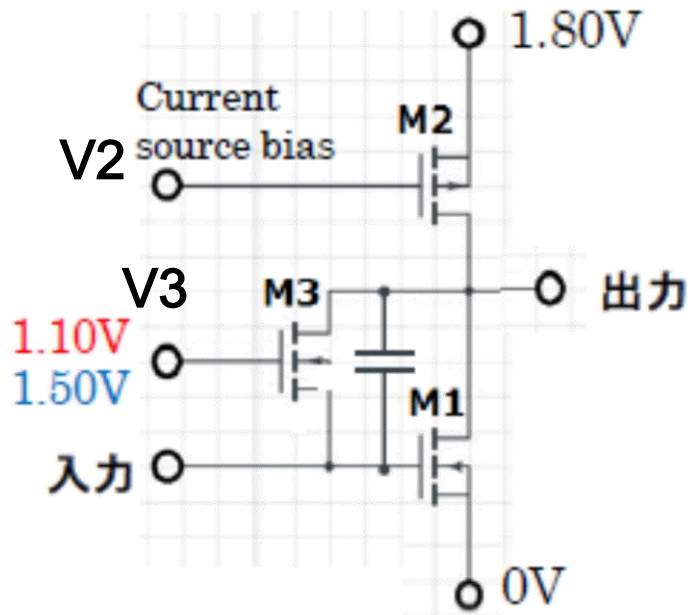


Test pulse input through $C=1\text{nF}$ capacitance at $T=3\text{K}$ and 350mK

- Power consumption $\sim 100\mu\text{W}$

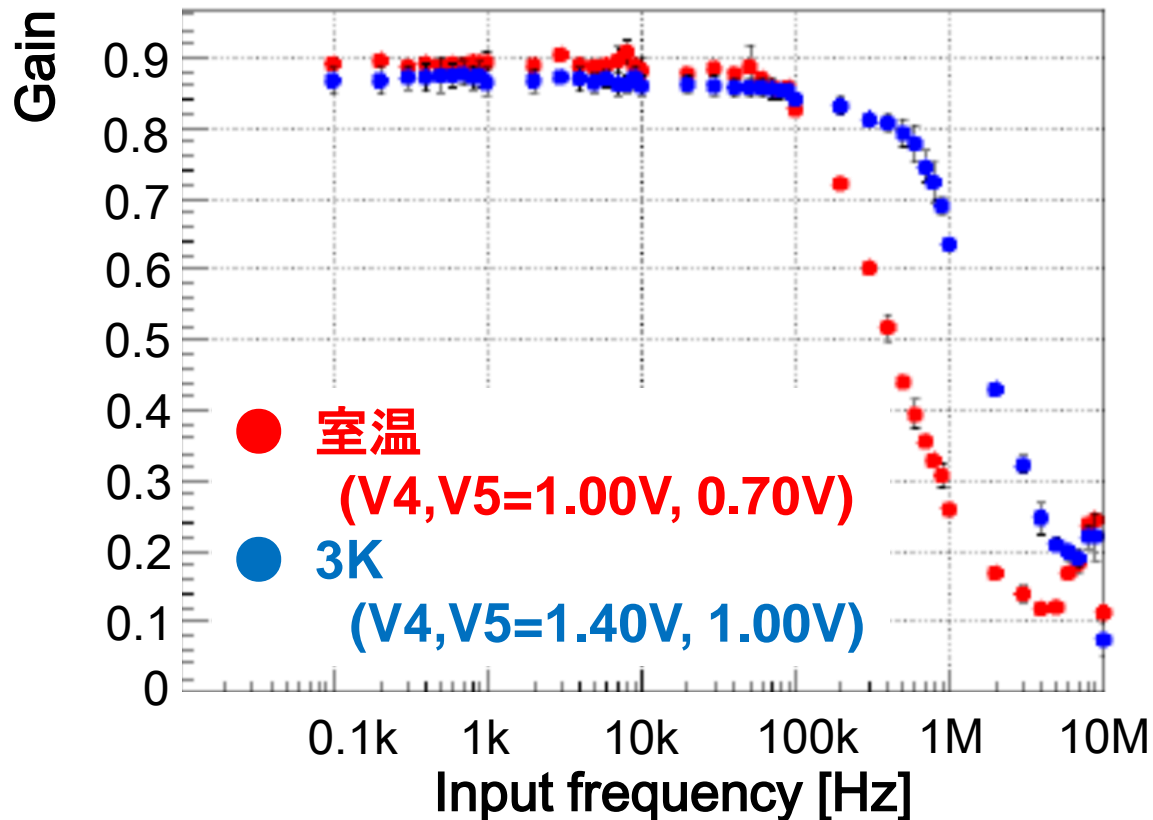
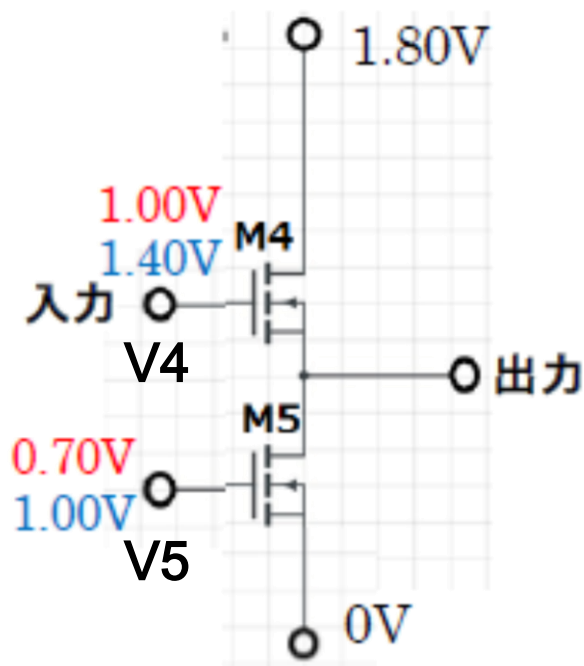
We can compensate the effect of shifts in the thresholds by adjusting bias voltages.

増幅段ゲイン



- 極低温時においてもバイアス電圧を調整することによってしきい値の変動を補償して、室温時と同じ増幅率を達成

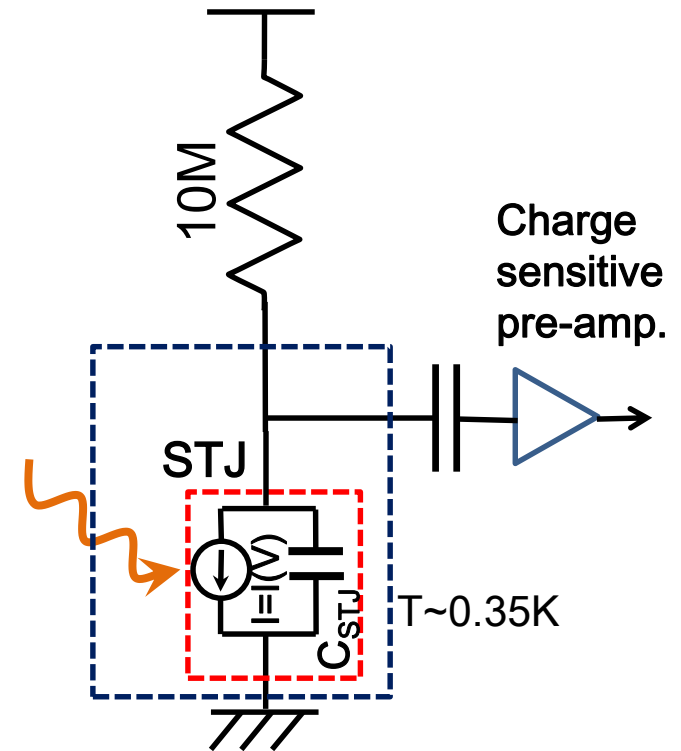
バッファ一段出力周波数依存性



- 極低温時においてもbias電圧の調整によって冷凍機配線～0.5nFの容量負荷に対して0.5MHz程度の出力周波数帯域を確保

SOI charge-sensitive pre-amplifier development

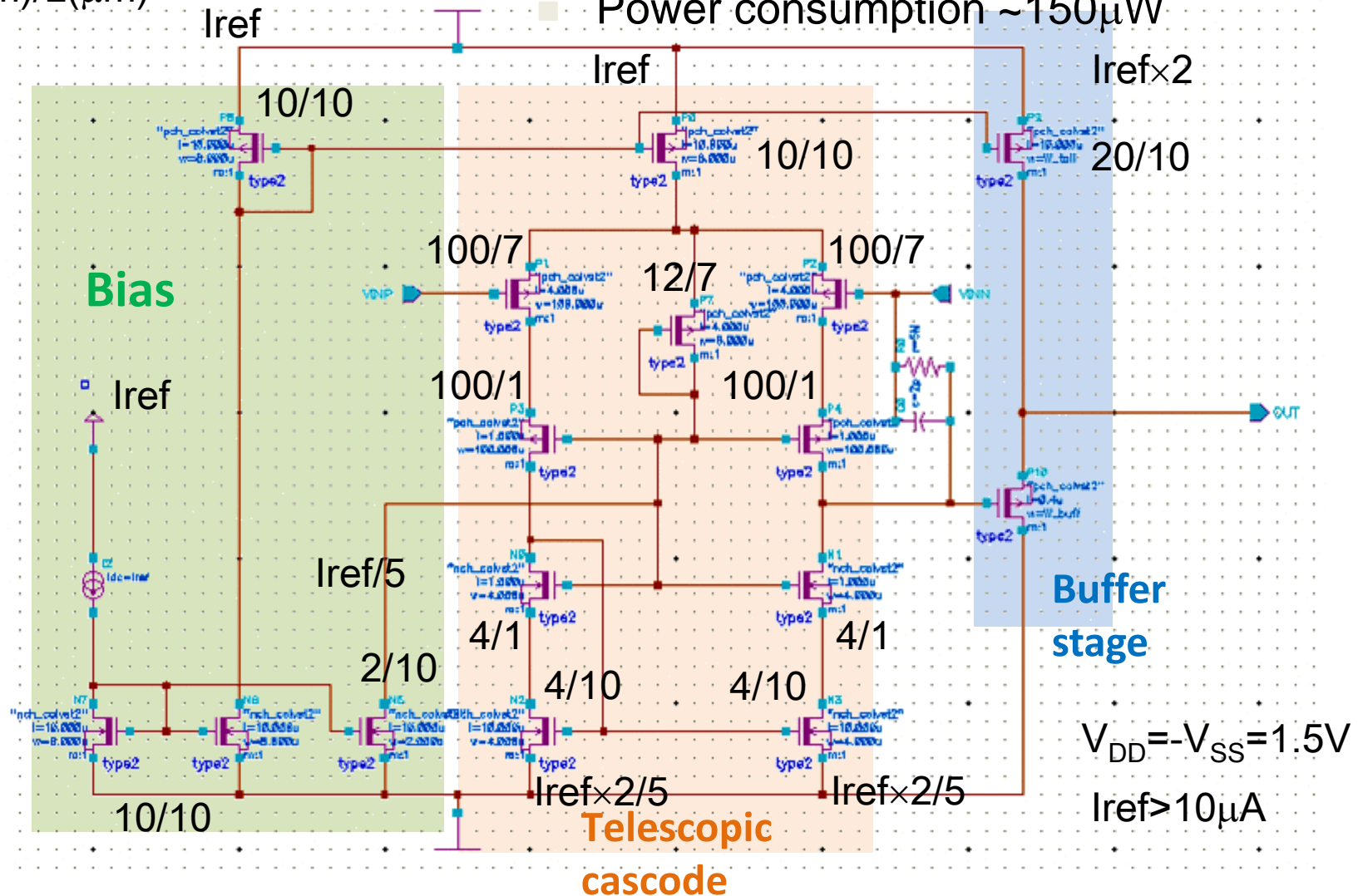
- STJは比較的大きな静電容量:
20 μm 角で $\sim 20\text{pF}$
 - ➔ 光子計数の利点を生かすためには、
低入力インピーダンスの電荷積分型
アンプが必要
- STJ応答時定数: $\sim 1\mu\text{s}$
 - ➔ 1MHz以上の帯域をもつSOIオペ
アンプを製作中



Op-amp Circuit

- telescopic cascode differential amplifier
- Feedback $C=2\text{pF} \times R=5\text{M}\Omega = 10\mu\text{s}$
- Power consumption $\sim 150\mu\text{W}$

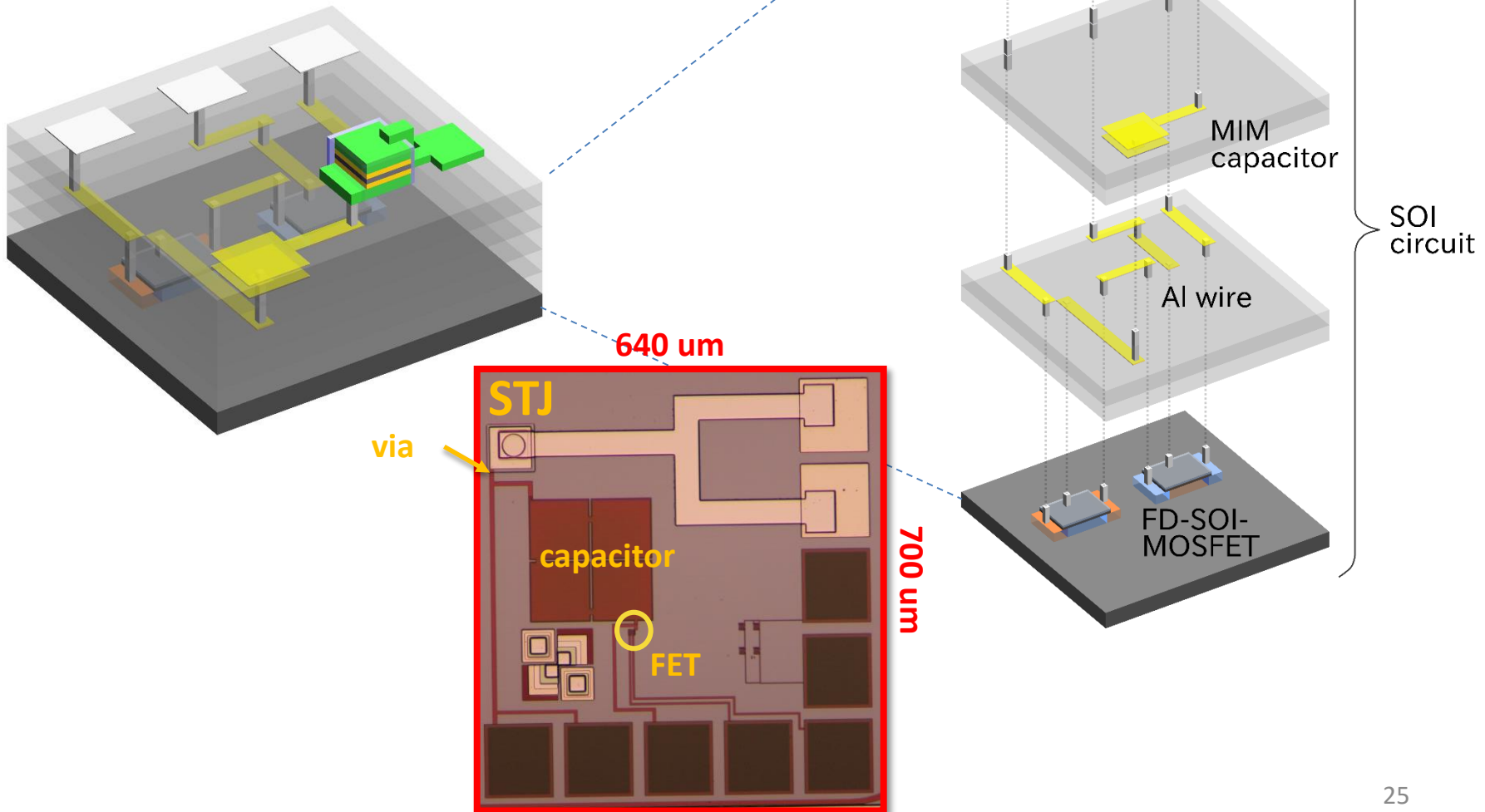
$W(\mu\text{m})/L(\mu\text{m})$



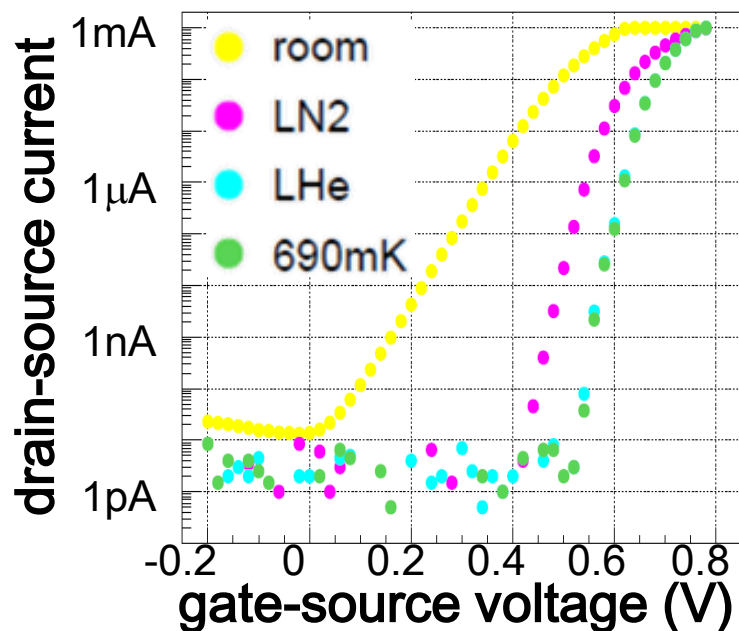
SOI増幅回路一体型STJ検出器(SOI-STJ)

SOI回路基板上にNb/Al-STJ検出器を直接形成した**増幅回路一体型**の検出器

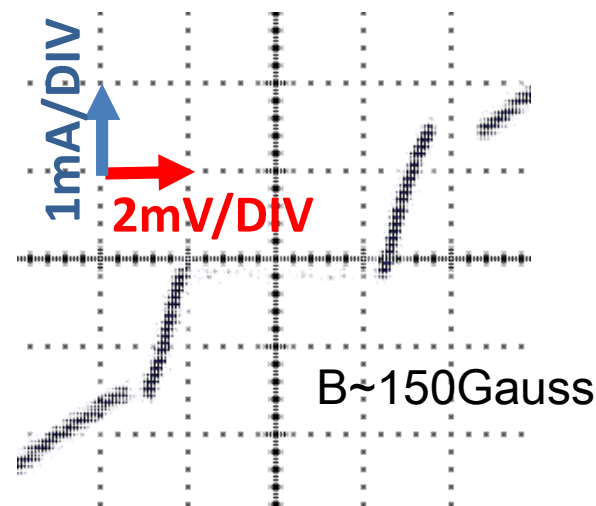
□ STJアレイ化(STJ大面積化)の可能性



SOI基板上へのSTJを形成後の特性



FD-SOI基板上にNb/Al-STJを形成後の
nMOS-FETの特性(KEKのプロセス装置使用)



FD-SOI基板上に形成されたNb/Al-STJの
I-V特性(KEKのプロセス装置使用)

- KEK のプロセス装置でSOI基板上へNb/Al-STJを作製
 - 通常のSi基板上のSTJと同等のI-V特性を観測
 - SOI基板中のn-MOS, p-MOS-FETともに極低温で動作
- 産総研CRAVITYでSOI基板上へのSTJ作製をテスト中

まとめ

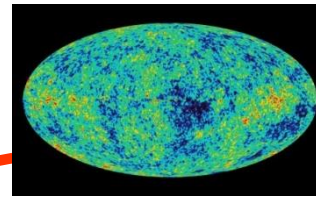
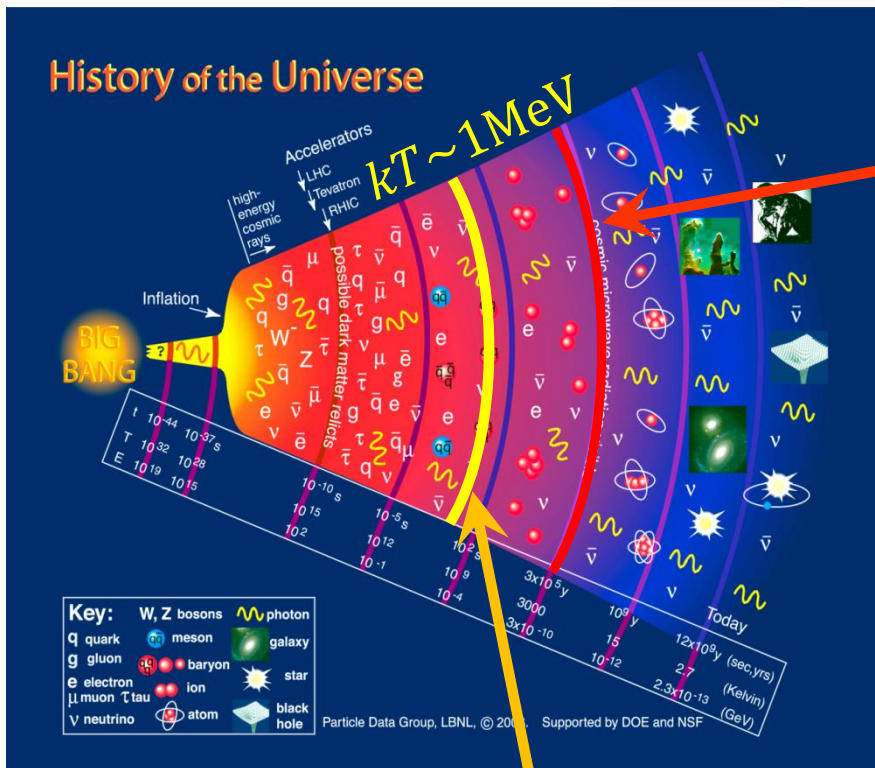
- COBAND(宇宙背景ニュートリノ崩壊探索)ロケット実験のための遠赤外光検出器($\lambda=50\mu\text{m}$)を開発中
- 超伝導トンネル接合素子(STJ) + SOI 読み出し回路
 - 極低温アンプ読み出しと光子計数により , $\text{NEP} \leq 10^{-20} \text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$ を目指す
- Nb/Al-STJ は , 産総研CRAVITY でほぼ十分な性能の低リーク電流のものが得られている .
- SOIに技術を用いた極低温アンプによる読み出し回路を開発中
 - SOIアンプの極低温での動作を確認 . 実際のSTJの光パルス信号読み出しテスト , ノイズ評価に向けた測定を準備中
 - 光子計数の利点を最大限に生かす低インプットインピーダンス高速アンプ(帯域 $>1\text{MHz}$)を製作中
 - SOI アンプー一体型STJの可能性

本講演のSOIアンプの設計は , VDECのサポートを受けて行われています .

* VLSI Design and Education Center(VDEC), the U. Tokyo in collaboration with Synopsys, Inc., Cadence Design Systems, Inc., and Mentor Graphics, Inc.

Backup

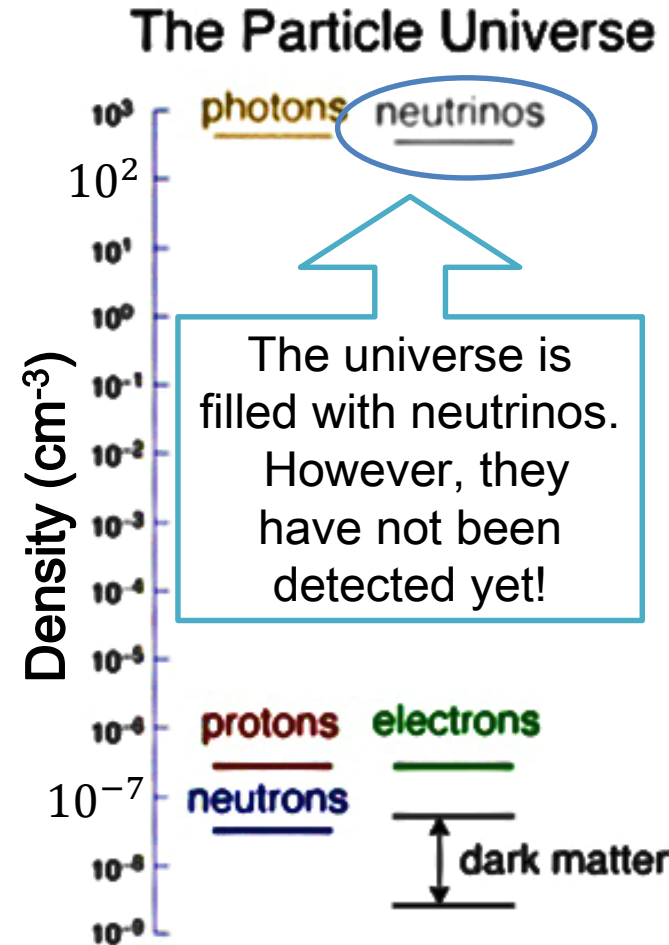
Cosmic neutrino background (CνB)



CMB

$$n_{\gamma} = 411/\text{cm}^3$$

$$T_{\gamma} = 2.73 \text{ K}$$



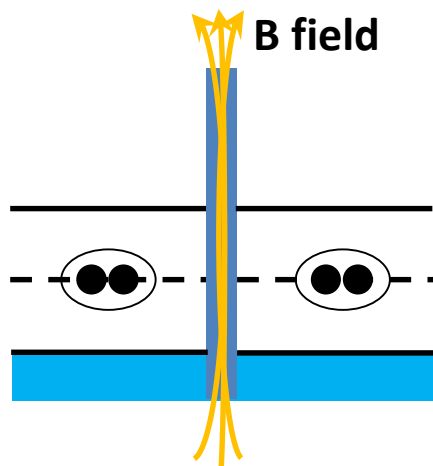
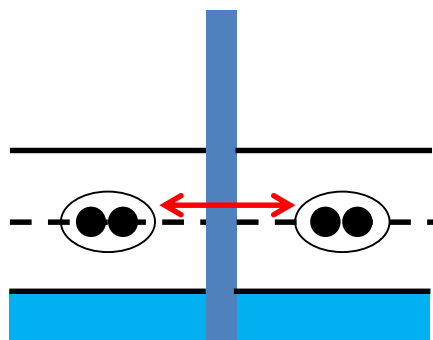
CνB (=neutrino decoupling)
~1s after the big bang

$$T_{\nu} = \left(\frac{4}{11}\right)^{\frac{1}{3}} T_{\gamma} = 1.95 \text{ K}$$

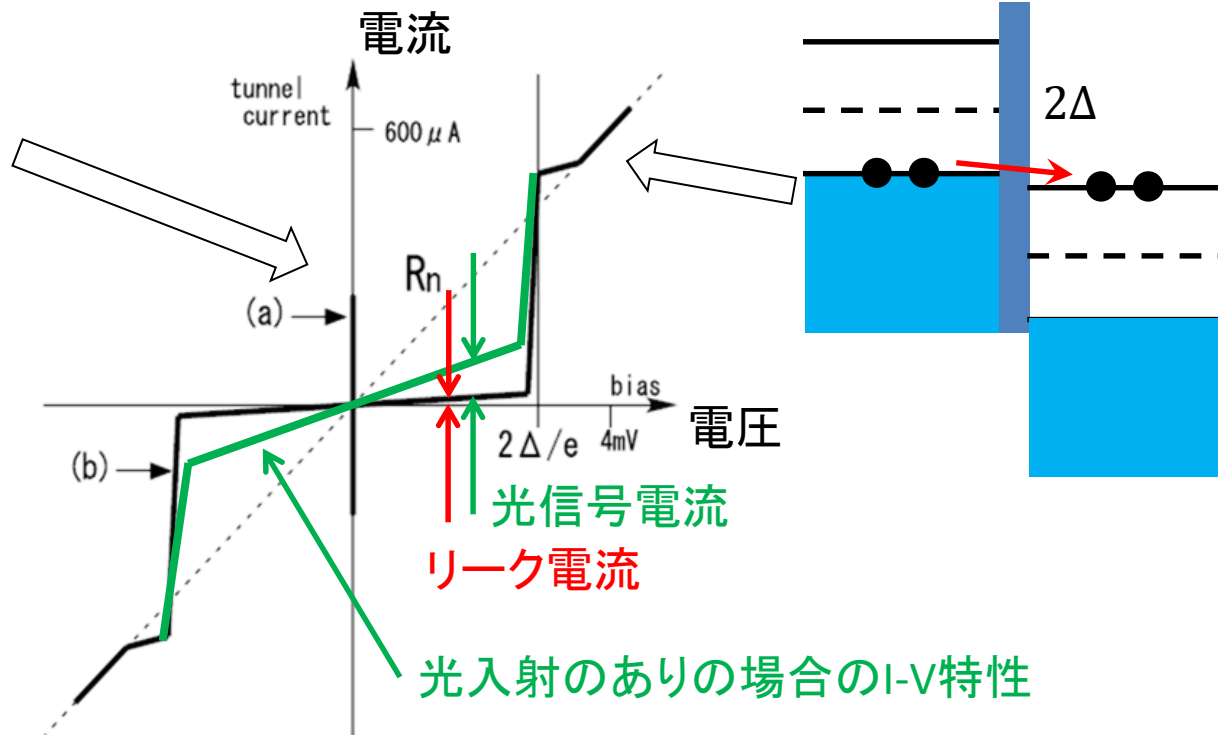
$$\langle p_{\nu} \rangle = 0.5 \text{ meV}/c$$

$$n_{\nu} + n_{\bar{\nu}} = \frac{3}{4} \left(\frac{T_{\nu}}{T_{\gamma}}\right)^3 n_{\gamma} = 110/\text{cm}^3$$

STJの電流－電圧特性(I-V カーブ)



クーパ対のトンネル
(ジョセフソン電流)は、
磁場印加により抑制



STJの光信号読み出し

- ➔ STJの両端に $|V| < 2\Delta$ のバイアス電圧を印加し光入射に伴うトンネル電流の増加を読む
- ✓ リーク電流が雑音として存在

STJ back-tunneling effect

- Quasi-particles near the barrier can mediate Cooper pairs, resulting in true signal gain
 - Bi-layer fabricated with superconductors of different gaps $\Delta_{\text{Nb}} > \Delta_{\text{Al}}$ to enhance quasi-particle density near the barrier
 - Nb/Al-STJ Nb(200nm)/Al(10nm)/AlOx/Al(10nm)/Nb(100nm)
- Gain: $2 \sim 200$

Photon

